

レーザー加工における有害物質の発生特性評価と環境対策

堀澤秀之*

1. 研究の目的と背景

1・1 レーザ加工における有害物質と環境対策

レーザー加工機を用いて材料を加工（主として切断，溶接，焼入れなどの熱加工）する場合，大量の粉塵，有毒ガス，臭気，タールミストなどが発生する。これらの成分はワーク材料やアシストガス（あるいはシールドガス）の種類によって異なるが，いずれも人体に重大な悪影響を及ぼすものがほとんどである。^{1,3)} 各種材料の加工時に発生し得る粉塵および発生ガスを表1²⁾に示す。アシストガスの種類にもよるが，例えば，鉄系材料については，各種鉄の酸化物，窒化物，オゾン，窒素酸化物などは各種悪影響をもたらし，特に，ステンレス鋼，表面硬化鋼などに含まれるクロムの化学反応により生成される六価クロムは毒性が強く極めて危険である。また，樹脂系材料については，アクリル樹脂加工時のアクリル酸ガスは強烈な臭気を発散し，塩化ビニル加工時のダイオキシン，塩素等はいうまでもなく猛毒である。一方，粉塵についての労働安全衛生基準に基づく身体的許容濃度は1.0 ppmであるが，レーザー加工時に発生する粉塵量は百倍から数百倍にもものぼる。^{1,2)} このことは発生ガスについても同様で許容値を大幅に超えているのが現状で，作業者の健康管理面から無視できない問題である。さらに，粉塵が加工機の摺動部に付着した場合には動作不良の原因となり，また，光学部品に付着した場合には局所的なエネルギー集中による光学面の破損などの悪影響を及ぼす。従って，この種の加工機による環境汚染はもはや放置できない問題であり，有効な解決策を講じることが急務とされている。^{1,3)}

そこで本研究では，これら汚染物質の発生特性を検討・評価し，さらに，環境汚染抑制のためのより有効な手段について検討することを目的とする。加工時に発生する粉塵の捕集には，乾式フィルタ式の集塵装置が広く一般的に用いられている。しかしながら，この場合，①比較的短時間でフィルタが目詰まりし吸引力が低減することで捕集性能が低下してしまうこと，②目詰まりしたフィルタの交換・清掃が頻繁である上にメンテナンス作業時の粉塵の再飛散が起こり得ること，などはいうまでもなく，③レーザー加工時に発生した高温粒子が大量に吸引されるためフィルタ火災などの事故の危険性があることなどが

特に問題であり，生産ラインにおける無人化運転の実現を困難にしている。一方，微粒粉塵の捕集にはコロナ放電を用いた静電式集塵法が有効とされているが，吸引量が少ないこと，コレクタ電極のクリーニング等のメンテナンスが困難であることなどの問題点が指摘されている。本研究では，これらの従来型集塵装置の問題点を解消するために，湿式でかつ微粒粉塵に対応可能な高性能集塵装置の実現を目指す。すなわち，より吸引量が高く，よりメンテナンスが容易な湿式集塵方法の確立について検討を加える。³⁾

1・2 レーザ切断加工における発生物質とその機構

レーザー切断加工においては，図1に示すように，集光レーザー光にてワーク材料の一部を熔融・蒸発し，同時に，レーザー光と同軸の高圧ガス（アシストガス）噴流の噴射にて熔融・蒸発物を切断カーブ（切断溝）から除去している。この際，材料加工点からは強い電磁波ならびに圧力波（音波）が発生することが知られている。^{4,5)} 特に，可視光領域の電磁波を発する発光物質は，ガス状発光物質の総称として「プラズマ」と称される場合が多い。しかしながら，この構成化学種，挙動，ならびに発生機構に関する知見はこれまでほとんど得られていない。^{4,5)} この種の発光については，その発生源が，①加工材料（固相，液相（熔融物），気相（分子，原子），プラズマ），②アシストガス（分子，原子，プラズマ），③周囲大気，等と考えられる。このことから，加工点における発光（電磁波）は，その位置に存在する各種物質の化学種，温度，密度などに関する多くの情報を含んでいるといえる。従って，この発光挙動を詳細に計測・診断することは，加工点の状態を知る上で極めて重要である。

そこで本研究では，この発光（あるいは発光物質（プラズマ））に注目し，その挙動の観察・診断を行った。ここではまず，各種加工条件における発光挙動について観察を行い，発光量・発光位置の観察，発光源・発光種の特定などから，発光機構について検討した。さらに，発光現象と切断性能（切断速度の速さ，切断面品質の良好性など）との相関関係についても検討を行い，切断機構の解明，ならびに発光を利用した切断加工時のインプロセス・モニタリングの可能性についても考察した。

表1 各種材料のレーザ加工時に発生し得る有害物質.²⁾

材 料	発生粉塵, 発生ガス	人体への影響
鉄鋼材料	各種鉄の酸化物, 窒化物, オゾン, 窒素酸化物	のど痛, 頭痛, めまい, 塵肺, 肺癌, 皮膚癌
含クロム鋼 (ステンレス鋼, 表面硬化鋼)	六価クロム	猛 毒
金属表面に付着した油など	アルコール系やベンゼン系などのガス	のど痛, 頭痛, めまい, 肺癌
アクリル樹脂	アクリル酸ガス	のど痛, 頭痛, めまい
塩化ビニル	ダイオキシン, 塩素	猛 毒
テフロン	フッ素	猛 毒
合 板	高温炭化粉塵, 接着剤 (尿素樹脂) の高温酸化ガス, 防腐剤のホルムアルデヒド, タール	のど痛, 頭痛, めまい, 塵肺, 肺癌

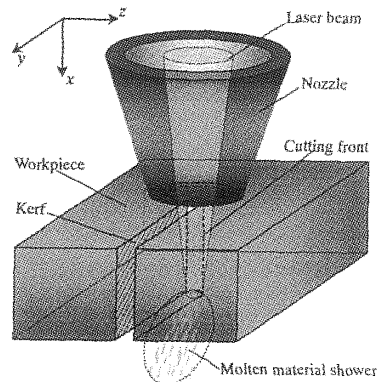


図1 レーザ切断加工の模式図

2. 実験装置および方法

2・1 レーザ切断加工における発光物質の挙動観察

本研究においては, 先細ノズル (ノズル口径: $\phi 3.2$ mm) を使用し, ノズル・ワーク間距離を 1.5 mm とした. なお, ワーク材料には板厚 8 mm のステンレス板 (SUS316L) を用い, 焦点位置をワーク裏面上とした. レーザ加工装置には, 6 kW 炭酸ガスレーザ加工機 (日平トヤマ製, 発振器: Fanuc 製 C6000B) を使用した. 通常, レーザ切断加工においては, 材料加工条件に適した出力のレーザを連続波あるいは連続パルス列の形式で照射するが, 本実験においては, 加工中のプラズマの挙動に注目するために, レーザ照射条件は各加工条件下で定常とした (レーザ発振形式: 連続発振 (CW: 6 kW), 切断速度: 一定, アシストガス供給圧力: 一定). また, アシストガスには窒素を使用し, 供給圧力を貯気槽圧力で最大 1.3 MPa とした. ここでは, レーザ出力 (P_L), 切断 (送り) 速度 (V_c), アシストガス供給圧力 (P_s) をそれぞれ変化した各種加工条件について, 加工点において発生するプラズマの発光 (可視光) 位置・分布, 挙動, 強度を, 高速度ビデオカメラ (PHOTRON: Fastcam-ultima-uv (40500 fps, 24.6 μ sec/frame)), カラー CCD カメラ (SONY: CCD-V700 (30 fps, 100 μ sec/frame)), ならびに分光器 (HAMAMATSU: PMA-10) を用いて観察した. なお, 観察方向は, 図に示すように切断溝開口部から切断点を覗く方向 ($-y$ 方向) および切断点の真横からワーク材料側面を覗く方向 ($-z$ 方向) とした.

2・2 模擬ワーク材モデルによる切断点の挙動観察

切断フロントにおける発光物質の挙動を観察するために, 図 2 に示すように切断フロント部が可視化可能な模擬ワークモデルを用いた切断試験を行った. なお, 撮影においては青白色のプラズマの挙動のみを観察するために, 中心波長 427 nm, 半値幅 12 nm のバンドパスフィルタを使用し, いずれも撮像速度: 9000 frame/sec, I.I.ゲート幅: 100 μ sec の条件で I.I 付高速度カメラで撮影した.

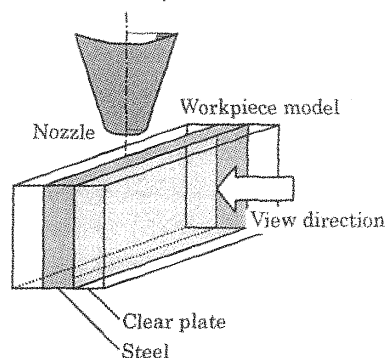


図2 切断現象観察用の模擬ワーク材モデル

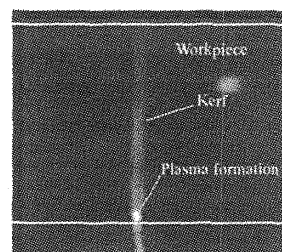


図3 切断溝 (カーフ) 内に発生した発光 (観察方向: $-y$ 方向)

3. 結果および考察

3・1 レーザ切断加工における発光物質の挙動

図 4 には, レーザ切断加工中の切断カーフ内の発光挙動をカーフに沿う方向 (図 1 中の $-y$ 方向) から高速度ビデオカメラによって撮影した画像の一例を示す ((a)切断速度: $V_c=1.5$ m/min, (b) $V_c=2.0$ m/min). なお, 各画像については画像処理を施し, 輝度分布を色違いの等高線で分けてある. 各図中の発光物質は 3 種類あり, ①切断溝内部 (切断フロントあるいは切断溝側面) に発生したプラズマ, ②切断溝内部にて下方に流動する溶融物, ③ワーク材料下方に飛散する溶融物, に大別される. (a) $V_c=1.5$ m/min の場合は, 切断溝下部においてドロス (溶

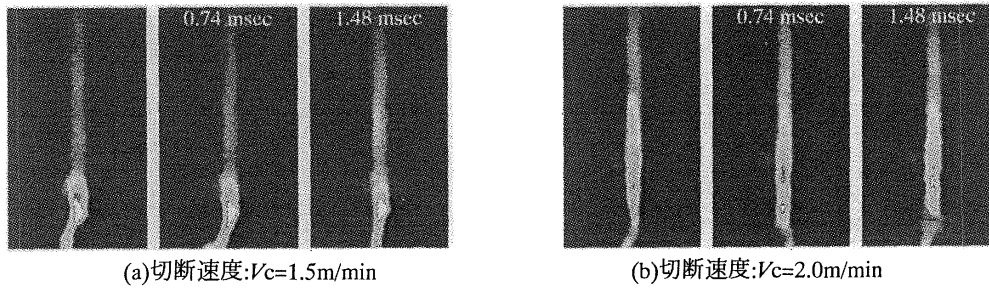


図 4 高速度カメラによる切断溝内の観察結果（各画像の輝度分布を画像処理により等高線に色分け，観察方向: $-y$ (13500 fps, 74 μ s/f), レーザ出力: $P_L = 6$ kW (CW), アシストガス: 窒素ガス ($P_s = 1.3$ MPa), ワーク材料: SUS316L ($t: 8$ mm)) .

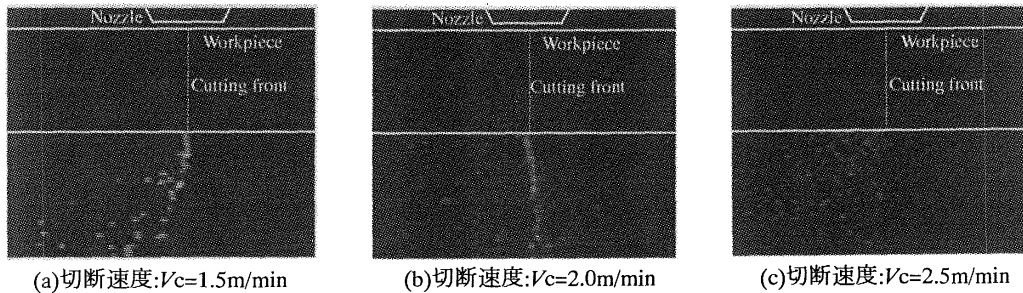


図 5 カラー CCD カメラによる溶融物飛散の様子（観察方向: $-z$ (30 fps, 100 μ s/f), レーザ出力: $P_L = 6$ kW (CW), アシストガス: 窒素ガス ($P_s = 1.3$ MPa), ワーク材料: SUS316L ($t: 8$ mm)) .

融物)の付着がなく，切断品質が最も良好な場合である。この場合，切断溝下部レーザー集光点付近において微小な輝点すなわちプラズマの発光がみられる。切断溝内部の溶融物は，切断溝上部・中間部・下部いずれの位置においても，一定の速度で下方に流動していることが確認された。また，切断溝下部出口においては，溶融物が切断溝幅程度以下の幅に集中しながら，内部における流動速度とほぼ同一速度で下方に排出されていることが確認された。これに対して，切断速度を速くした(b) $V_c=2.0$ m/minの場合には，切断面が良好ではあるものの，切断溝下部において若干のドロスの付着がみられた。この場合，レーザー集光点付近におけるプラズマの発光位置は，より範囲が広く，その輝点が縦方向に二ヶ所並んでいるのがわかる。切断溝内部の溶融物は，上部・中間部では一定速度で流動しているが，下部のプラズマ生成領域付近では，速度が低下しているのが認められた。また，切断溝下部出口においては，溶融物が切断溝幅よりも広範囲に拡散しながら，間欠的に下方に排出されているのが確認された。

図 5 には，図 4 と同様の各条件における加工時のワーク材料下方に飛散する溶融物の挙動を真横（図 1 中の $-z$ 方向）からカラー CCD カメラで撮影した画像の一例を示す (a)切断速度: $V_c=1.5$ m/min, (b) $V_c=2.0$ m/min, (c) $V_c=2.5$ m/min) . (a) $V_c=1.5$ m/min の場合，溶融物は比較的個々の粒径が大きく，輝度が高く，各々が比較的同一方向（下方）に飛散していることがわかる。これに対して切断速度を増大した場合 (b) $V_c=2.0$ m/min, (c) $V_c=2.5$ m/min) ,

飛散溶融物の粒径・輝度は，速度増大に伴ってともに減少し，飛散範囲はより拡大していることが確認された。すなわち，ドロスが切断溝下部に付着する加工条件下では，ドロス付着無し（ドロスフリー）の場合（図 4(a), 5(a)）と異なり，切断溝出口における溶融物の飛散範囲がより拡大する（ $\pm y$ 方向， $\pm z$ 方向）ことが確認された。

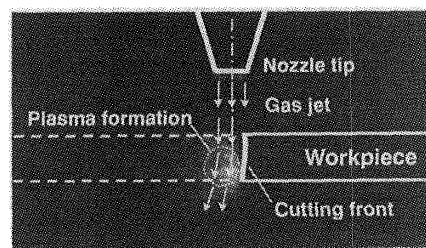
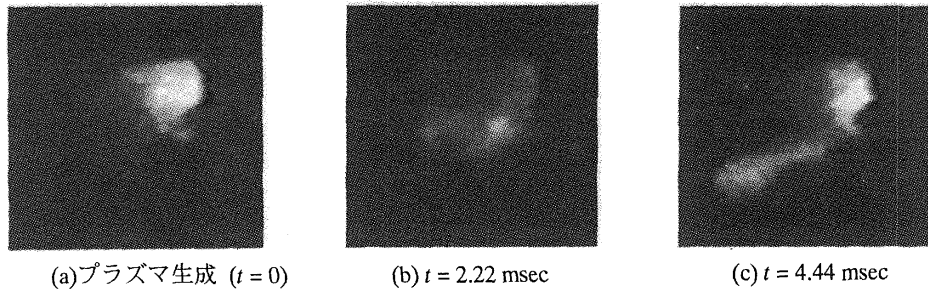


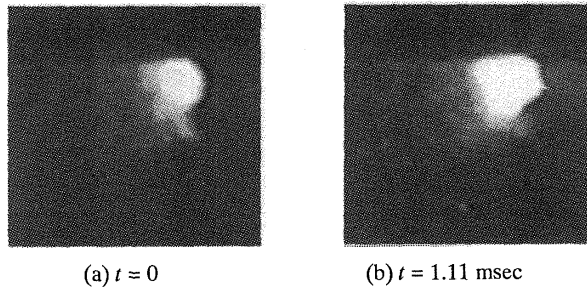
図 6 切断フロントにおけるプラズマの生成

3・2 切断フロントにおける発光物質の挙動

図 6 には切断フロントが観察可能な模擬ワーク材モデル（図 2）を用いて切断試験を行い，真横（ $-z$ 方向）から I.I.付高速度ビデオカメラで観察した結果の一例を示す (9000 frames/sec, 100 μ sec/frame, 干渉フィルター: $\lambda_{center} = 427$ nm (FWHM = 12 nm)). 図に示すように，切断フロントに対してレーザー光が照射されると，照射点の物質は溶融・蒸発し，これがノズルからのアシストガス噴流によって吹飛ばされることで切断溝が形成される。これと同時に，光軸上に存在する物質から輝度の高いプラズマの発光が認められる。これらの観察結果から，切断フロント



(a)プラズマ生成 ($t = 0$) (b) $t = 2.22$ msec (c) $t = 4.44$ msec
 図7 アシストガス噴流の動圧による溶融物の除去過程, (a)プラズマ生成, (b)溶融により溶融物の液滴生成, (c)溶融物の液滴の離脱 (9000 fr/sec, 100 μ sec/fr) .



(a) $t = 0$ (b) $t = 1.11$ msec
 図8 蒸発に伴うリコイル力による材料の除去過程, (a)上部におけるプラズマ生成, (b)プラズマ生成に伴う切断フロントからの材料の爆発的飛散 (9000 fr/sec, 100 μ sec/fr) .

から材料が除去されるプロセスは、大きく分けて二通りあることが確認された。すなわち、①アシストガス噴流の動圧による除去（図7）、および②材料の蒸発に伴うリコイル力による除去（図8）である。

図7では、(a)プラズマ生成の2.22 msec後に、(b)溶融物が下方に流動し液滴を生成し始め、さらに(c)4.44 msec後に生成された液滴が離脱する。ここで、溶融物の下向きの流動は、その速度が数 m/sec 程度であることから、重力の作用よりもむしろ切断フロント表層に作用するアシストガス噴流の動圧の影響が支配的と考えられる。図より、溶融物が切断フロント下部から離脱するとき、プラズマの発光はさほど強くなく、また、同時にほぼ垂直（直角）の切断フロントが形成されているのが分かる。

一方図8では、切断フロント上のレーザー照射点において、爆発的な材料の蒸発がプラズマ生成とほぼ同時に認められた。このとき図8(b)より、溶融・蒸発物は、下向きのアシストガス噴流の方向とは無関係に四方に飛散していることが分かる。また、この場合の飛散速度は150 m/sec程度であった。この場合、図7の場合とは異なり、切断フロントにおいてより連続的なプラズマ生成が認められた。また、切断フロントにおけるプラズマ生成の起点には微小な窪みが見られる。このような起点があることから、材料の飛散はレーザーが照射された点から起こるといえる。これらのことから、この場合の材料の飛散は、切断フロントのレーザー照射点における材料の蒸発に伴うリコイル力によるといえる。

表2 各種粉塵の組成および平均粒度

試料	X線回折	平均粒度 (全体)	平均粒度 (20 μ m以下)
		乾式篩法	湿式沈降法
レーザー加工粉塵	Fe ₃ O ₄	59 μ m	0.35 μ m
プラズマ加工粉塵	Fe ₃ O ₄ (FeC)	62 μ m	磁性による凝集のため測定不可
溶接ヒューム	Fe ₃ O ₄	20 μ m以上なし	0.55 μ m

3・3 レーザ切断加工により発生する粉塵

図9には、軟鋼をレーザー切断したときに発生した粉塵のSEM写真を示す。図より粉塵は主に球形および多角形体の2種類みられ、粒径は1 μ m程度以下から数十 μ m、あるいは1 mm程度までと広範囲にわたって分布することが確認された。正確な粒度分布を測定するためには、粉塵の比重を知る必要があるため、まず、X線回折により粉塵の成分分析を行った。その結果、この場合の粉塵の主たる成分は酸化鉄(Fe₃O₄)であることが判明した。さらに、詳細な顕微鏡観察から、粉塵中には、内部が空洞の球形Fe粒および酸化鉄の微粒子が混在していることが分かった。これらのことから、1種類の粒度測定法のみでは、正確さを欠くので、比較的大きい粒子を対象とした乾式篩法と20 μ m以下の粒子を対象とした湿式沈降法(島津SA-CP3L)を併用した。これらの結果を表2に示す。なお表には、比較のためプラズマ切断により排出された粉塵と溶接ヒューム(いずれもワーク材は軟鋼)との結果についても示す。また、図10、11にはレーザー加工で発生した粉塵について、それぞれの方法により測定し

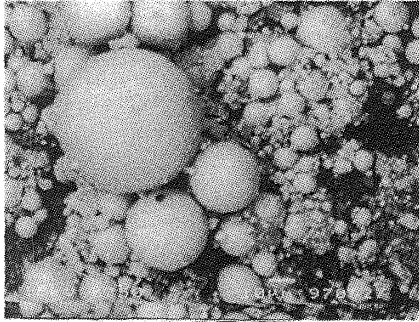


図9 レーザ切断加工により発生した粉塵のSEM写真

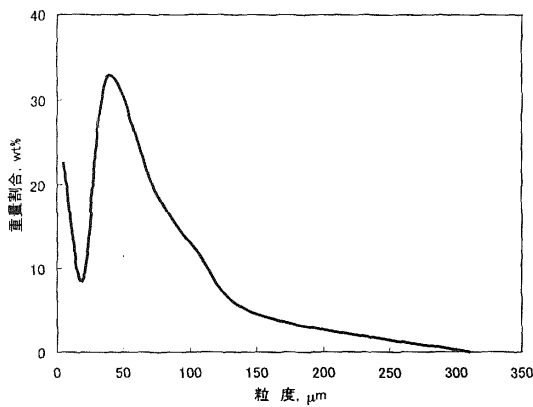


図10 乾式篩法による粒度分布測定結果
(粒径 20 μm 以上の粉塵を対象)

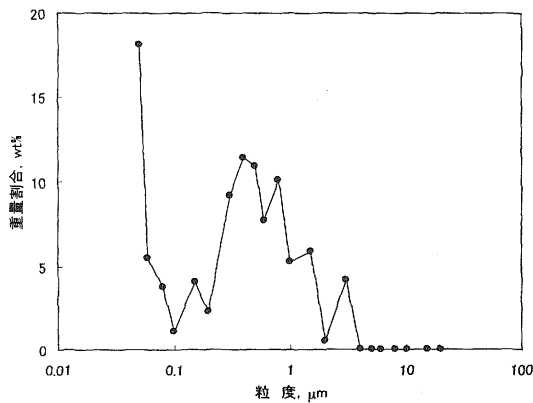


図11 湿式沈降法による粒度分布測定結果
(粒径 20 μm 以下の微粒粉塵を対象)

た粒度分布を示す。表2および図10より、乾式篩法による結果では、粒度が50 μm程度までは粒径の減少に伴って粒子数が増大し、より小さい粒度については20 μm程度まで粒子数が急激に減少する傾向にある。しかしながら、この方法では、粒径が20 μm以上の粉塵を対象としているため、この辺りの粒度分布は正確とはいえないが、粒度が50~60 μm付近でピークを持っていることは明らかである。一方、20 μm以下の粉塵の粒度分布(図11)については、粒度が数μm程度以上の粒子はほとんど存在

せず、それ以下で粒度の減少とともに粒子数が増大し、0.3~0.4 μm付近でピークを示した後減少し、0.1 μm付近で極小となり、さらに粒度の細かい数十 nmの場合に増大することが分かる。

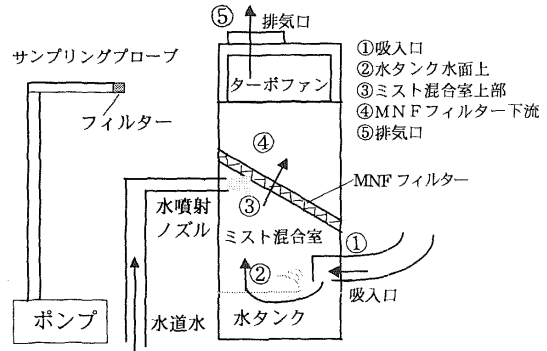


図12 湿式集塵装置の概略図

4. 環境対策

4・1 湿式集塵装置の性能向上に向けた方策

湿式集塵装置は、①メンテナンスが容易、②高温粉塵による火災の防止、③圧力損失が小さい、などの特徴があるが、捕集性能が従来の乾式フィルタ式集塵機に比べて低いという欠点を持つ。本研究では、既存の湿式集塵機(株)ニコテック製 NMC-20 (処理風量 20 m³/min) の捕集能率を向上させることで、より高性能な集塵機を開発する指針を見出すことを目的としている。実験装置の概略図を図12に示す。本集塵機は図に示すように主として3種類の構成要素、すなわち大粒径粉塵補足用水タンク、粉塵・ミスト混合室および慣性衝突型メカニカル・フィルターからなる。まず吸入口から吸引された粉塵は水タンク水面に衝突し、ここで主として大粒の粉塵が慣性力により水タンク内に沈殿する。それ以外の微粒粉塵の一部は、ミスト混合室内でミスト発生板より発生したミストに捕獲され、ミスト分離用メカニカルエアフィルター(MNF フィルター: 多重慣性衝突により水分を空気から分離する機構を有する)でミストとともに気流から分離され、水タンクに沈殿するという捕集方式をとる。本研究では、まずこの集塵機の捕集能力を評価するため、一定量の粉塵(レーザ加工粉塵)を強制吸入させたときの各捕集要素における捕集可能/不可能な粉塵の形状、粒径を調べた。ここでは、図に示すサンプリングプローブを集塵機内部に挿入し、5カ所(図中①~⑤)で粉塵のサンプリングを行った。サンプリングフィルター(ポリエステル製テフロン微孔膜ラミネート、対象粒子径 0.1 μm以上)に捕集された粉塵の観察ならびに粒径・数密度測定はSEMにて行った。現集塵機の捕集率を上げるための新機構として、(1)ミスト混合室への水噴射(最大流速

16.4 m/s), (2) 水タンクへの界面活性剤の添加(最大 0.034 vol%)の 2 つについて検討した. ここでは, 吸入口より吸引させた粉塵の重量 (W_{in}) と排気口から排出された粉塵の重量 (W_{out}) を測定し, 両者の差を集塵機に捕集された粉塵重量 $W_c (= W_{in} - W_{out})$ とみなし, 吸入量との重量比 W_c / W_{in} を捕集率 (wt%) と定義した.

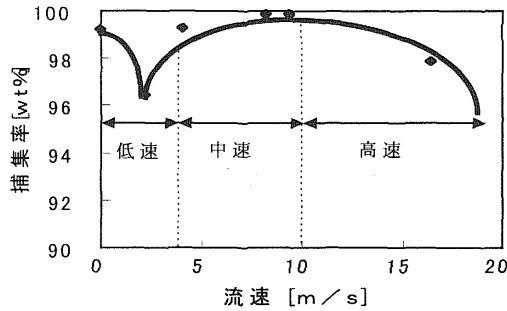


図 13 水噴射流速と捕集率の関係

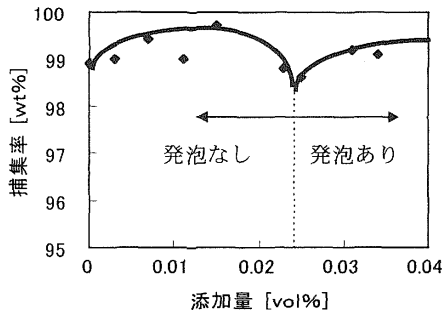


図 14 界面活性剤の添加量と捕集率の関係

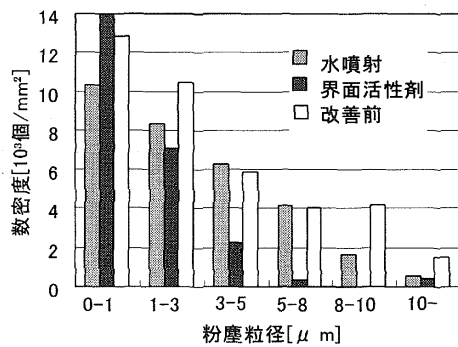


図 15 水噴射 (8.2 m/s) と界面活性剤添加 (0.007vol%) の場合の粉塵粒度分布

(1) 水噴射の効果

図 13 に水噴射流速と捕集率の関係を示す. 流速 4 m/s 程度以下では水噴流が MNF フィルターに届かない状態 (低速) で, 4~10 m/s 付近までは MNF フィルターに弱く衝突する程度 (中速) で, 10 m/s 以上では MNF フィルターに衝突した水が再飛散する状態 (高速) である. 水噴流の速度が低速の場合, 捕集率は流速の増大に伴って

低下傾向にある. 水噴流が中速の場合, 捕集率は流速の増大に伴って増し, 10 m/s 付近で最大 (= 99.8%) となり, その後, 流速の増加とともに減少する. このことから水噴流の流速には最適値が存在し, これを越える場合には捕集率が向上しないことがわかる.

(2) 水タンクへの界面活性剤の添加

図 14 には界面活性剤の添加量 (水タンク中の水量 80 l に対する体積割合) と捕集率との関係を示す. この図より界面活性剤の添加量に対しては捕集率が 2 つの極大値をもつことがわかる. 一番目の極大値と二番目の極大値との境界は 0.025 vol% 付近である. この点は, 集塵機作動中に発泡が起こり始める点 (目視で確認できる程度) とほぼ一致する. 発泡なしの場合では約 0.018 vol% 添加したときが最も捕集効果が高く (99.7%), さらに添加量を増し, 発泡限界に近づくにつれて捕集率は低下する. 0.025 vol% 以上で発泡が起こり始め, 添加量の増大につれて捕集率が徐々に上がる.

図 15 に水噴射と界面活性剤との場合の排気口における粉塵すなわち捕集不可能な粉塵の各粒径の数密度を測定した結果を示す. 図より, 界面活性剤を添加した場合は, 粒径が 1 μm 以上の粉塵の数密度は著しく低下することが分かる. 一方, 水噴射の場合は, 粒径が 3 μm 以下の粉塵に対して特に有効であると言える.

5. 結 言

高速度カメラを用いたレーザー切断加工における排出物の生成特性の評価を行い, 材料の切断除去機構がアシストガス動圧による流動とレーザー照射点の材料の蒸発に伴う飛散の 2 種類であることを確認した. また, 飛散粉塵の成分・組成の分析, ならびに粉塵の粒度の分析を行い, 軟鋼切断時の粉塵が主として酸化鉄 (Fe_3O_4) であり, 粒度については, 60 μm , 0.35 μm , 数十 nm 程度の 3 種類のピークが存在することが分かった. また, 環境対策として, 湿式集塵装置の高性能化に向けた試行実験を行い, 水噴射および界面活性剤の添加により, 良好な捕集性能の向上が確認された.

参 考 文 献

- 1) 安井ほか: ステンレス鋼のレーザー溶接時における金属ヒュームの分布状態, 作業環境 14 (1990), 92.
- 2) 伊藤, 岩田: レーザー加工における環境対策-除塵・脱臭についての考察-, OPTRONICS 5 (1995), 140.
- 3) 堀澤ほか: 湿式集塵機の性能向上に関する研究, 1998 年度精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集 (1998), 122.
- 4) HORISAWA, H. et al.: Plasma Characterization in Laser Cutting, Proceedings of SPIE Vol.3888 (2000), 82.
- 5) HORISAWA, H. et al.: Plasma Behaviors in Laser Cutting, Proceedings of SPIE Vol.4088 (2000), 280.